

泡沫沥青对热拌沥青混合料路用性能的影响

李包^{1,2}, 李宁¹, 陈晨¹, 刘雨鑫¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏高速公路工程养护技术有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:采用泡沫沥青但不降低沥青混合料的生产温度,成为泡沫沥青技术一种新的施工工艺,但是泡沫沥青对热拌沥青混合料性能的影响缺乏相关研究。该文以现场钻取芯样和室内成型试件为研究对象,通过动态蠕变试验和SCB弯曲试验,研究泡沫沥青对热拌沥青混合料高低温性能的影响。最后,通过铺筑试验段,评价泡沫热拌沥青混合料的施工效果。结果表明:泡沫沥青可以改善传统热拌沥青混合料的高温稳定性和低温抗裂性能,室内马歇尔成型的沥青混合料试件无法完全模拟现场沥青混合料的铺筑情况;在相同的施工工艺下,相较于普通热拌沥青混合料,泡沫热拌沥青混合料可以达到更大的压实度。

关键词:泡沫沥青; 泡沫热拌沥青混合料; 动态蠕变试验; 低温 SCB 试验; 试验段

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

随着国家对于环保要求日益严格,传统热拌沥青混合料能耗高、污染严重的特点面临着巨大的环境压力。泡沫温拌沥青技术作为温拌技术的主流技术,具有减少排放、降低生产成本、拓宽施工季节等优势,得到越来越多的应用^[1-2]。

泡沫温拌沥青技术原理为冷水加入热沥青中,由于热沥青温度较高瞬间使发泡水气化,沥青体积瞬间增大成为泡沫沥青,降低沥青的黏度,提升沥青混合料的施工和易性^[3]。泡沫温拌沥青混合料具有较好的和易性,可低于传统热拌沥青混合料 20~30℃条件下施工,可弥补温度损失导致改性沥青混合料路用性能降低的缺陷^[4-6]。目前低温季节下,传统热拌沥青混合料无法保证路面的铺筑质量,将温拌技术应用于传统热拌沥青混合料生产工艺,即热拌温铺技术,可有效解决低温环境下无法正常施工的难题。成高立等^[7]采用添加温拌剂的方式进行了热拌温铺技术的研究,发现热拌温铺技术施工的路面与传统热拌沥青混合料路面路用性能相当;李源渊等^[8]通过添加表面活性剂的方式,对比研究了温拌沥青技术和热拌温铺技术在低温环境下施工的情况,发现热拌温铺沥青技术可在更低的环境温度下施工。但是将泡沫沥青应用于传统热拌沥青混合料研究不多,泡沫沥青对热拌沥青混合料路用性能和路面使用性能的影响,缺乏相关研究。

为评价泡沫沥青对热拌沥青混合料路用性能和路

面使用性能的影响,真实反映泡沫热拌沥青技术的应用现状,该文依托沥青拌和站,以现场施工段落为主要研究对象,同时结合室内试验,采用动态蠕变试验和SCB弯曲试验评价泡沫热拌沥青混合料的高低温性能。最后,通过铺筑试验段的形式,评价泡沫热拌沥青混合料的铺筑质量。

1 原材料与试验

1.1 材料与试样

1.1.1 沥青

沥青为 SBS 改性沥青,其各项性能指标(表 1)均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

| 检验项目 | 单位 | 检测值 | 技术指标 |
|----------------|--------|------|-------|
| 针入度 | 0.1 mm | 59.3 | 60~80 |
| 5℃延度 | cm | 36 | ≥30 |
| 软化点 | ℃ | 87 | ≥60 |
| RTFOT 短期 质量损失 | % | 0.03 | ≤0.6 |
| 老化后(163℃, 针入度比 | % | 78 | ≥65 |
| 85 min) 5℃延度 | cm | 23 | ≥20 |

泡沫沥青采用 XFP20 泡沫沥青发泡设备进行生

产,发泡用水量为沥青质量的 2.5%,发泡温度为 165℃,发泡水温度为 20℃左右。

1.1.2 集料

粗细集料均来自江苏某厂家,集料石质类别为玄武岩,根据规范开展 SMA-13 混合料的配合比设计,最佳油石比为 5.9%,木质纤维素的掺量控制为沥青混合料质量的 0.3%。传统热拌及泡沫热拌沥青混合料采用相同的级配,沥青混合料级配如表 2 所示。

表 2 SMA-13 混合料级配组成

| 筛孔/mm | 通过率/% | 筛孔/mm | 通过率/% |
|-------|-------|-------|-------|
| 16.0 | 100 | 1.18 | 19.7 |
| 13.2 | 93.7 | 0.6 | 16.1 |
| 9.5 | 62.0 | 0.3 | 13.4 |
| 4.75 | 26.7 | 0.15 | 12.0 |
| 2.36 | 23.4 | 0.075 | 9.1 |

1.1.3 试样

试件所用的沥青混合料均来源于间歇式沥青拌和楼,真实反映了泡沫热拌沥青混合料的生产情况。泡沫热拌沥青混合料和传统热拌沥青混合料采用相同的拌和温度,均为 175℃,试验所用的试件来源于室内成型和现场取芯。

室内试件由马歇尔击实仪制备而成,泡沫热拌沥青混合料和传统热拌沥青混合料的生产温度控制为 175℃,成型温度控制为 155℃。现场试件取自某高速公路上相邻的两条养护路段,研究路段上面层分别铺筑泡沫热拌和传统热拌沥青混合料,两者的生产温度均为 175℃,运输时间均为 2 h,并采用相同的摊铺和压实工艺。研究路段路面施工结束后,在开放交通之前,采用钻芯取样,钻芯筒内径为 100 mm。

室内成型的标准马歇尔试件和现场钻取的芯样统一切割厚度均为 4 cm。其中,用于 SCB 弯曲试验的试件,芯样沿直径切割,分割为两个半圆形试件。

1.2 试验

1.2.1 动态蠕变试验

动态蠕变试验是在特定的试验温度下对圆形试件施加一定规律的轴向循环荷载,研究沥青混合料的高温性能。依据 NCHRP 中 Simple Performance Test 的周期加载永久变形试验,使用 UTM25 万能试验机,环境箱温度为 60℃,半正弦间歇加载波形,最大荷载为 0.7 MPa,加载周期为 1 s,其中加载和间歇时间分别为 0.1 s、0.9 s,加载 10 000 次或者轴向应变达到

$1\times 10^{-5}\mu\epsilon$ 为试验终止条件,记录芯样应变随加载次数的变化。

1.2.2 SCB 弯曲试验

SCB 试验同样使用 UTM25 万能试验机,采用 3 点加载模式,底部为梁式支座,间距为 80 mm,底部支座涂抹润滑油,减少滑动阻力。试件在 -10℃ 的环境箱中保温 4 h 以上,以 50 mm/min 的竖向位移加载速率进行加载,记录整个试验过程中的荷载和位移。

采用弯拉强度、弯拉应变和断裂能,评价芯样的低温性能,公式^[9-10]为:

$$\sigma_t=4.8\times F/D \tag{1}$$

$$\epsilon=\frac{6\times L\times d}{11.4\times D^2\left(5.578\frac{L}{D}-1.369\right)} \tag{2}$$

式中: σ_t 为最大拉应力(MPa); F 为最大荷载(N); D 为试件直径(mm); ϵ 为最大拉应变; L 为支座间距(mm); d 为中心部位挠度(mm)。

试件断裂能越大,说明材料在低温条件下破坏需要更大的能量,低温抗裂性能更加优越。断裂能的计算涵盖了试验中试件各个时刻的荷载和变形情况,比较全面地反映了沥青混合料的低温抗裂性能^[11-12]。公式为:

$$G_f=\frac{\int Pdu}{bh} \tag{3}$$

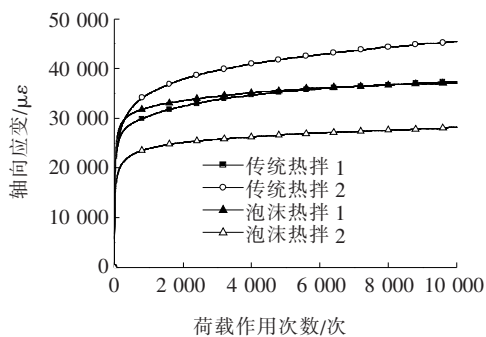
式中: G_f 为断裂能(J/m²); P 为施加荷载(N); u 为平均负载线位移(m); h 为试件高度(m); b 为试件厚度(m)。

2 试验结果与分析

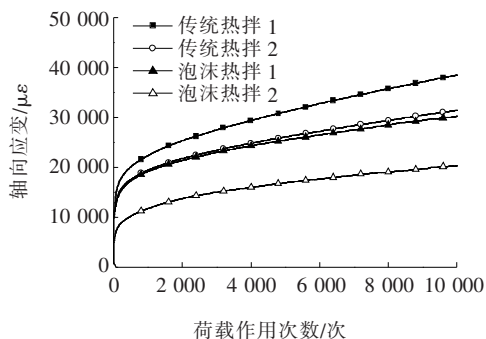
2.1 动态蠕变试验数据分析

在动态蠕变试验的循环加载荷载下,沥青混合料一般经历压密迁移期、变形稳定期和流变破坏期 3 个变形阶段。一般认为沥青混合料进入第 3 阶段后,塑性变形迅速增长,沥青混合料发生流变破坏。具体表现为由第 2 阶段转到第 3 阶段时,蠕变速率迅速增大,认为该突变点对应的加载次数为沥青混合料发生流变破坏的次数,用于评价沥青混合料高温性能。泡沫热拌和传统热拌沥青混合料的动态蠕变曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出:室内芯样和现场芯样中的泡沫热拌沥青混合料的动态蠕变曲线均位于传统热拌沥青



(a) 现场取芯芯样



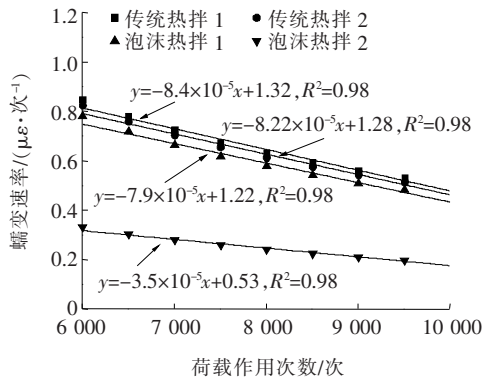
(b) 室内成型芯样

图 1 芯样的动态蠕变曲线

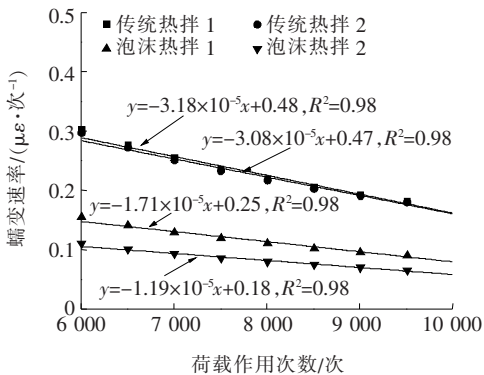
混合料的下方,从蠕变曲线的发展趋势来看,室内芯样和现场芯样均处于动态蠕变的变形稳定阶段,未出现第 2 阶段到第 3 阶段的拐点,说明芯样在 10 000 次加载周期内未进入第 3 阶段流变破坏,无法得到流变次数的评价指标,原因可能在于现场钻取的上面层芯样仅有 4 cm,在现有的加载模式下无法使其发生流变破坏,为进一步判断芯样是否终止于第 2 阶段变形稳定期,对蠕变曲线进行深入分析,如图 2 所示。

由图 2 可知:第 2 阶段的动态蠕变曲线变化趋于稳定,蠕变速率趋近于定值,对芯样的蠕变速率与荷载作用次数进行线性拟合,得到拟合方程 $y = k\varepsilon + c$,若拟合方程斜率 k 非常小,趋近于 0,表明芯样处于第 2 阶段,以此确定第 2 阶段对应的加载次数范围^[13]。

采用 Origin 数据处理软件,根据轴向应变数据计算出蠕变速率,然后进行线性拟合,结果见图 2。由图 2 可见:各芯样回归方程相关系数 R^2 均为 0.98,斜率 k 直接近于 0,表明 6 000~10 000 次荷载作用次数范围内,芯样处于第 2 阶段稳定期,同时验证了芯样在 10 000 个加载周期后未进入第 3 阶段。因此该文采用芯样的最大轴向应变和第 2 阶段的蠕变速率作为评价指标,结果如图 3、4 所示。



(a) 现场取芯芯样



(b) 室内成型芯样

图 2 芯样第 2 阶段蠕变速率曲线拟合

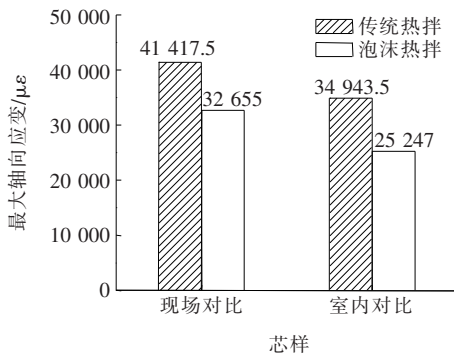


图 3 芯样的最大轴向应变均值

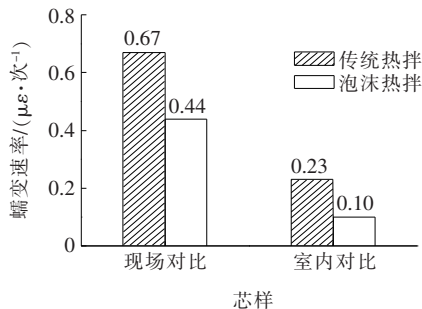


图 4 芯样的蠕变速率均值

由图3、4可知:

(1) 从最大轴向应变来看,现场芯样和室内芯样呈现相同的规律,即传统热拌沥青混合料的最大轴向应变均大于泡沫热拌沥青混合料,芯样经受10 000次周期的循环加载以后,传统热拌沥青混合料产生了较大的塑性变形,表明泡沫热拌沥青混合料在高温条件下抵抗变形的能力优于传统热拌沥青混合料。这种现象可归因于泡沫热拌沥青混合料具有较好的和易性,在同样的压实功下,泡沫热拌沥青混合料得到更好的压实,具有更加优越的高温性能。

(2) 从蠕变速率来看,现场芯样和室内芯样呈现相同的规律,即传统热拌沥青混合料的蠕变速率均大于泡沫热拌沥青混合料,相同的荷载作用次数下,传统热拌沥青混合料产生更大的塑性变形,表明泡沫热拌沥青混合料具有较好的高温稳定性。这种现象同样可归因于泡沫沥青改善热拌沥青混合料的施工和易性,使骨料得到更好的嵌挤,进而改善沥青混合料的高温性能。

2.2 SCB 弯曲试验数据分析

通过分析现场芯样和室内芯样的SCB弯曲试验数据,得到层底弯拉强度、层底弯拉应变和断裂能等,结果如图5~7所示。

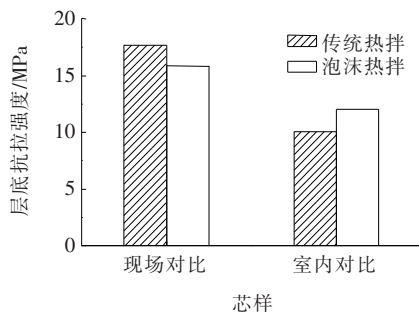


图5 芯样的层底弯拉强度均值

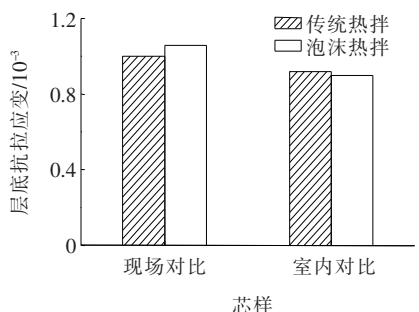


图6 芯样的层底弯拉应变均值

由图5、6可知:

(1) 现场芯样中泡沫热拌沥青混合料层底弯拉强

度小于传统热拌沥青混合料层底弯拉强度,泡沫热拌沥青混合料层底弯拉应变大于传统热拌沥青混合料层底弯拉应变,低温环境下泡沫热拌沥青混合料表现出更好的变形能力,表明泡沫沥青可以改善沥青混合料的低温性能。

(2) 从室内芯样层底弯拉强度和层底弯拉应变试验数据可知,与现场芯样的规律不一致,表明室内马歇尔成型的试件不能完全模拟现场成型情况。

(3) 对比现场芯样和室内芯样的层底弯拉强度发现,现场芯样的层底弯拉强度明显高于室内芯样,这种结果归因于现场芯样在大型碾压设备下能够得到更充分的压实,而室内芯样采用马歇尔击实成型,沥青混合料的空隙率略大,较大空隙的沥青混合料在施加弯拉应力的情况下容易被压碎,降低了材料的硬度,从而降低了沥青混合料的抗弯拉强度^[14]。

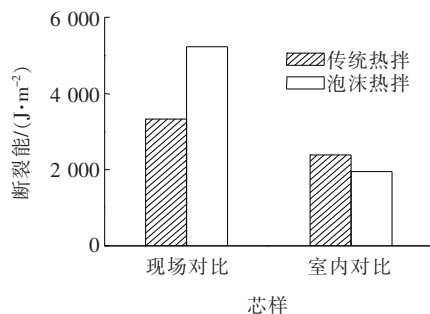


图7 芯样的断裂能均值

由图7可知:

(1) 现场芯样中泡沫热拌沥青混合料断裂能大于传统热拌沥青混合料断裂能,泡沫热拌沥青混合料破坏需要更大的能量,表明泡沫沥青可以提升沥青混合料的低温抗裂性能。

(2) 从室内芯样断裂能试验数据分析可知,与现场芯样的规律不一致,表明室内马歇尔成型的试件无法完全模拟现场成型情况。

3 现场施工效果评价

3.1 施工温度对比

采用FLUKE TiS50红外热像仪追踪试验段沥青混合料施工温度,对比泡沫热拌和传统热拌沥青混合料温度的变化情况,结果如图8所示。

由图8可知:泡沫热拌沥青混合料和传统热拌沥青混合料摊铺温度相当,从扫描面温度的分布情况可知,两种沥青混合料都存在一定程度的温度离析。泡

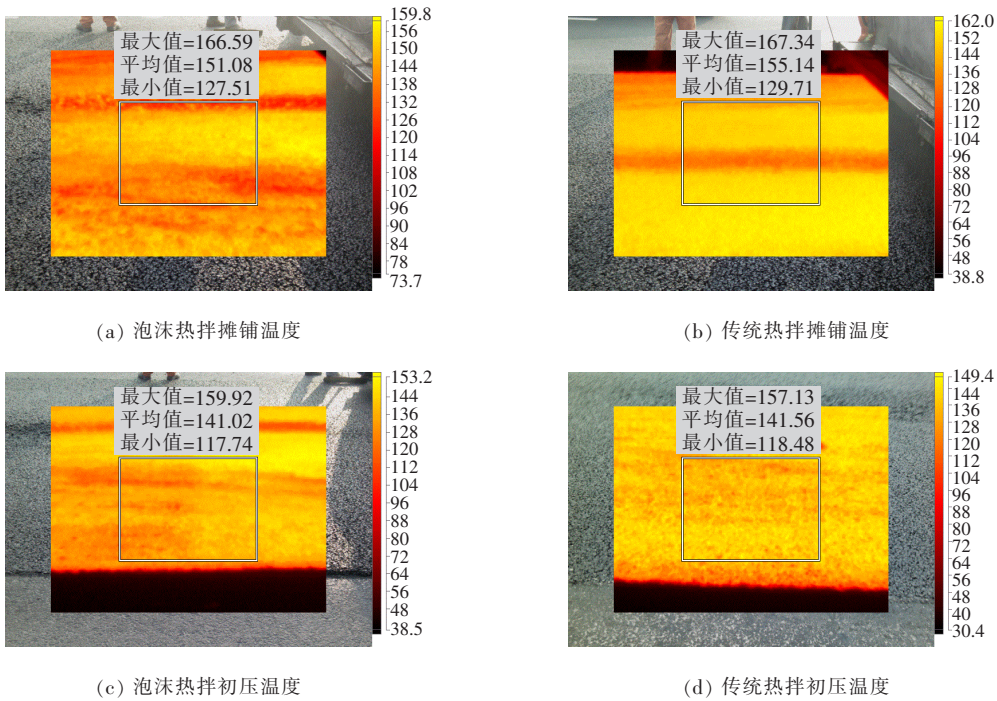


图 8 试验段摊铺和初压温度红外热成像图片(单位:℃)

沫热拌沥青混合料和传统热拌沥青混合料初压温度相当,均分布在 140℃左右。

3.2 路面使用性能对比

试验段铺筑结束后,在开放交通前进行路面使用

性能检测,对试验段分别进行了压实度、摩擦系数、渗水系数和构造深度等检测,结果如图 9 所示。

由图 9 可知:泡沫热拌沥青混合料的压实度整体上大于传统热拌沥青混合料,压实度数据离散性更小,

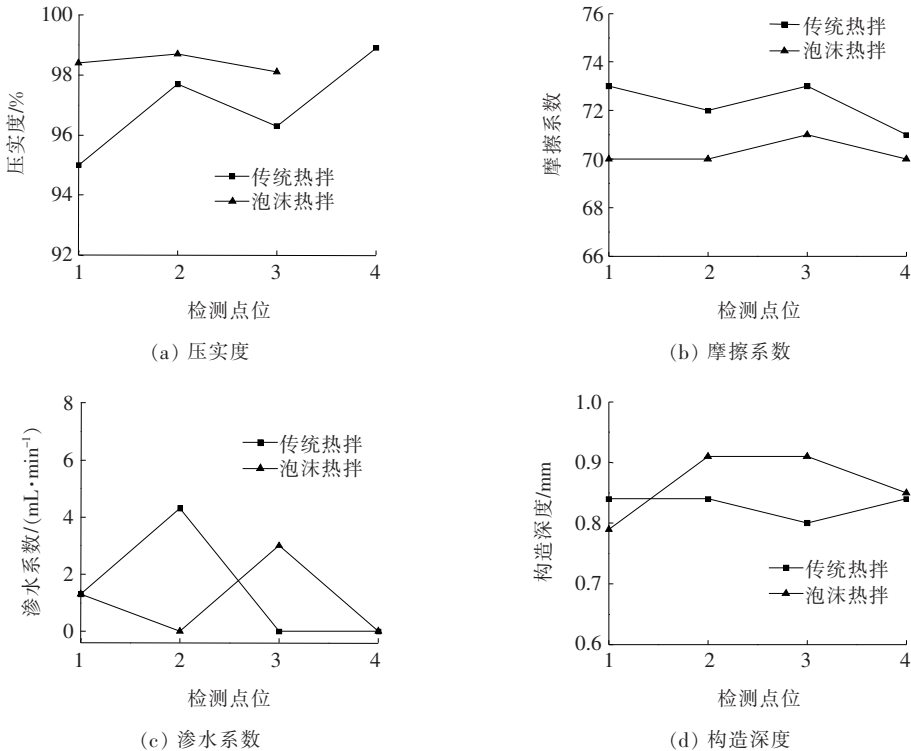


图 9 路面使用性能测试结果

压实得更加均匀。这与泡沫沥青可以提升沥青混合料的施工和易性有关,沥青发泡使得沥青黏度降低,体积增大,可以更充分裹覆集料,使泡沫热拌沥青混合料在相同压实功的作用下,更容易实现彼此嵌挤,从而达到更好的压实效果。泡沫热拌沥青混合料的摩擦系数略小于传统热拌沥青混合料,渗水系数和构造深度两者相当。

4 结论

(1) 泡沫沥青可以提升传统热拌沥青混合料的高温性能,同时改善传统热拌沥青混合料的低温抗裂性能。

(2) 与普通热拌沥青混合料相比,在相同的施工工艺下,泡沫热拌沥青混合料可以达到更大的压实度。

(3) 室内马歇尔成型的沥青混合料试件无法完全模拟现场沥青混合料的铺筑情况,评价沥青混合料的路用性能应以现场芯样为主。

参考文献:

- [1] ALQADI I L, BAEK J, LENG Z, et al. Short-Term Performance of Modified Stone Matrix Asphalt (SMA) Produced with Warm Mix Additives[R]. Downers Grove: Illinois Center for Transportation, 2012.
- [2] BAIRGI B K, TAREFDER R A, AHMED M U. Long-Term Rutting and Stripping Characteristics of Foamed Warm-Mix Asphalt (WMA) through Laboratory and Field Investigation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 790—800.
- [3] 吴英彪, 郭艳芳, 石津金, 等. 泡沫沥青温拌技术在道路工

程中的应用[J]. 市政技术, 2011, 29(4): 17—21.

- [4] 孙宗全. 泡沫温拌沥青混合料和易性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(2): 66—68, 88.
- [5] 侯曙光. 热拌与温拌沥青混合料和易性试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(5): 36—39.
- [6] 吴英彪, 石津金, 张瑜, 等. 泡沫沥青温拌混合料的施工和易性[J]. 市政技术, 2020, 38(4): 266—269.
- [7] 成高立, 弥海晨, 郭彦强, 等. 热拌温铺技术在低温季节沥青路面施工中的应用研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 53—56.
- [8] 李源渊, 孙建勇, 宋晓燕. 不同类型沥青混凝土低温施工应用研究[J]. 公路交通技术, 2020, 36(1): 16—21.
- [9] 曹轲铭. 沥青混合料半圆弯拉试验方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [10] MOLENAAR A A A, SCARPAS A, LIU X, et al. Semi-Circular Bending Test: Simple But Useful? [C]. Asphalt Paving Technology, 2002.
- [11] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 50—57.
- [12] PEREZ-JIMENEZ F, BOTELLA R, MOON K H, et al. Effect of Load Application Rate and Temperature on the Fracture Energy of Asphalt Mixtures. Fénix and Semi-Circular Bending Tests[J]. Construction & Building Materials, 2013, 48: 1 067—1 071.
- [13] 黄刚, 何兆益, 黄涛. 沥青混合料动态蠕变黏弹性特性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 1 211—1 216.
- [14] SAHA G, BILIGIRI K P. Homothetic Behaviour Investigation on Fracture Toughness of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bending Test [J]. Construction & Building Materials, 2016, 114: 423—433.